フォトメトリックステレオ法 反射解析による画像コントラストの強調

アーノード・リナ、ピエラントニオ・ボリエロ、カティア・オストロフスキ

フォトメトリックステレオ法は、さまざまな方向から照明を当てて撮影した画像を組み合わせて反射を解析することにより、画像コントラストを強調することのできる効果的なコンピュテーショナルイメージング手法である。

マシンビジョン分野における主要な課題の1つは、対象とする物体または特徴（欠陥や記号など）を一般的な背景から高い信頼性で識別できるように、十分なコントラストの画像を生成することである。それらの特徴は、他の部分と同じ色合いでありながら、表面から突起または埋没している場合や、表面の他の部分とコーティングやテクスチャが異なっている場合がある。

そうした状況に対し、十分なコントラストを生成するのは難しい。しかし、フォトメトリックステレオ法は、さまざまな方向から照明を当てて撮影した画像を組み合わせて、それらの画像から得られた反射を解析することにより、コントラストを強調した画像を生成する、効果的なコンピュテーショナルイメージング手法である。

フォトメトリックステレオの理論

均等に色付けされた物体があるとしよう。その表面上の陰影は通常、光源に対する表面の向きと、入射光の性質によって変化する。そのため、1枚の画像で物体表面のすべての細部を捉えることはできないことはよく知られている。

フォトメトリックステレオ法は、物体の3D形状を2Dテクスチャから切り出すコンピュテーショナルイメージング手法である。2Dテクスチャ（ザラザラした表面や凹凸のある表面など）を3D表面から除去した後に、フォトメトリックステレオ解析によって、物体の表面曲率を算出して、従来の画像処理手法では検出できないかもしれない小さな欠陥を特定することができる。

基本的に、フォトメトリックステレオ法では、照明条件の光強度を変えることにより、異なる照明条件下で同じ位置から対象物体を観測することによって、物体の表面法線を算定する[1]。

この処理において、カメラは照明に対して固定で、一連の画像を取得する間、その他のカメラ設定は変更しないと仮定される。こうして得られた画像を組み合わせることによって、1枚の合成画像が作成される。その放射制約から、表面の向きと表面の曲率の両方の局所的な推定値を得ることができる[1]。

フォトメトリックステレオイメージングは、複数画像における反射率と照明の既知の組み合わせから導出したデータに基づいて、物体の表面の向きと曲率を示すことを目的とする。これは、生産や製造ラインなど、品質管理と品質保証の要件が厳しいマシンビジョン用途において非常に重要な処理である。

ランベルト（Lambert）は1760年の自書「Photometria」で、完全な拡散反射、つまり「ランベルト反射」の概念を初めて示した。ランベルト面とは、観測者の画角にかかわらず、表面放射がすべての方向に均等となる理想的なマット面のことである[2]。ウーダム（Woodham）によるフォトメトリックステレオの理論は、ランベルトの概念に基づいている。初期の研究では、表面反射モデルがランベルト面に限定されていた。その仮定によって、計算は大幅に簡素化される。

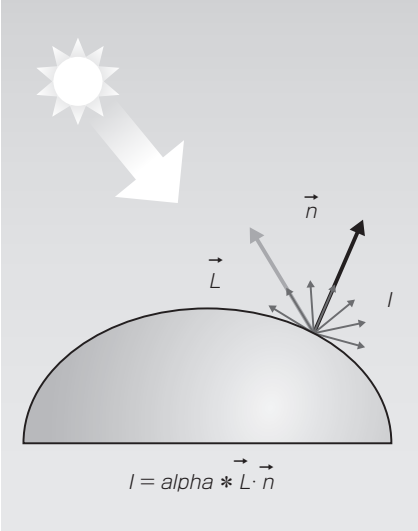

図1　拡散反射の例を示した図。拡散反射光の強度Iは、入射光方向Lと表面法線nの関数となる。アルベドは、表面で反射される入射日光の割合である。

フォトメトリックステレオの理論はその後、Phongモデル、Torrance-Sparrowモデル、Wardモデルなど、非ランベルト面の反射モデルも含むように拡張された。より最近の研究によって、この手法の可能性はさらに拡大されている[3]。対象表面の3D高さも、表面の向きから導出することができる。ただし、ステレオ測光に基づく3D再構築は、一般的に分解能が限定される。また、物体の表面特性に左右されやすいため、実用化は非常に難しい。

理論から実装へ

フォトメトリックステレオの登録処理では、ランベルト（マット、拡散）面に基づく強調画像を計算する際に、材料の反射特性と物体の表面曲率を使用する。この場合、拡散反射光の強度Iは、入射光方向Lと表面法線nの間の角度に比例する（**図1**）。比例係数は、アルベド（albedo）反射率*alpha*で、これはランベルトの余弦則の概念である[4]。表面のアルベドは、その表面で反射される入射日光の割合である[5]。

したがって、この例における未知数は、表面法線nとアルベド反射率*alpha*である。光源は遠くにあり、すべての光線は平行であるとみなす。照明設定（光源ごとに1つ）内の方向Lから、方向Lは事前に既知となる。

これらの未知数を解くにはまず、同一平面上にない3つ以上の光方向で物体を撮像する。各画像は、それぞれ特定の光方向に対応する（**図2**）。それぞれ特定方向の照明で撮影されたこれらの画像を使用して、物体の各ポイントにおけるアルベド値と法線を計算することができる。

フォトメトリックステレオ解析によって導出される表面法線に関する情報により、物体表面に関する重要な情報を明らかにすることができる。例えば、滑らかに見える表面上に存在する、表面の不規則性（エンボス加工や彫刻加工された形状、引っかき傷、くぼみなど）などである。

フォトメトリックステレオ法では、対象領域の法線を求めるために少なくとも3枚の画像が必要だが、イメージング処理に固有のノイズを抑え、より正確な画像を生成するために、それ以上の方向の光源を使用するのが、一般的である[6][7]。複数画像による冗長性が、より良い解析結果を生む。実際には通常、最低で4枚の画像が必要になる（**図3**）[8]。

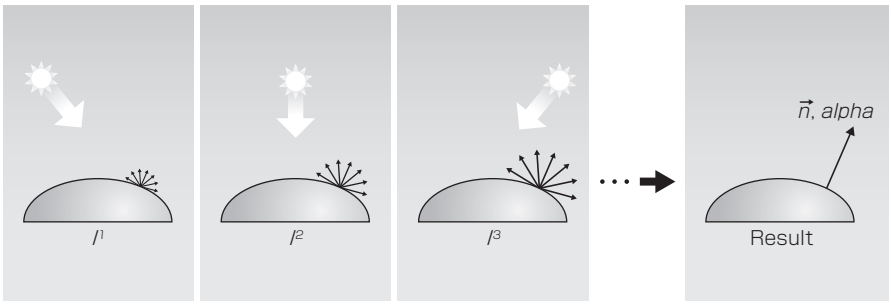

図2　フォトメトリックステレオのコンピュテーショナルイメージングを実行する際には、未知数を定めるために、同一平面上にない3つ以上の光方向が必要である。

照明に関する考察／計算

光源が遠く、光線は平行であるというのは、対象領域の寸法に応じて照明システムが慎重に選定される多くのビジョン分野において、理にかなった仮定である。セグメントバーやリングライトなどの適切な照明ツールが、米アドバンスト・イルミネーション社（Advanced illumination）、米CCSアメリカ社（CCS America）、米スマート・ビジョン・ライツ社（Smart Vision Lights）といった多数の企業によって市場に提供されている。こうした専用光源は、フォトメトリックステレオ機能を搭載するマシンビジョンソフトウェアを提供する、加マトロックス・イメージング社（Matrox Imaging）などの企業が、簡単に組み込んで設定できるようになっている。

照明の方向と光強度が既知の場合、フォトメトリックステレオは、線形システムとして解くことができる。照明位置は、光源の設定構成に基づいて算出するか、例えば鏡面反射球を使用して、画像から較正することができる（**図4**）。照明情報が未知の場合は、未較正フォトメトリックステレオという、はるかに難しい問題を解かなければならない。このような場合に対して、フォトメトリックステレオを計算するための解法は存在するが、照明方向が既知でないことから、未較正の解法は撮像条件に左右されやすく、再現性が低い可能性があることに注意が必要である[9]。

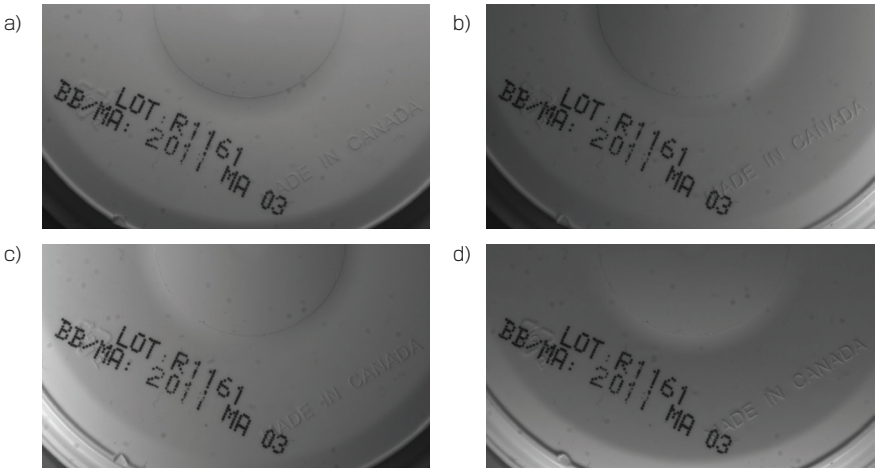

図3　4枚の画像は、光源が(a)上部、(b)右側、(c)左側、(d)下部から光を発する場合で、それぞれ物体の見え方が異なることを示している。

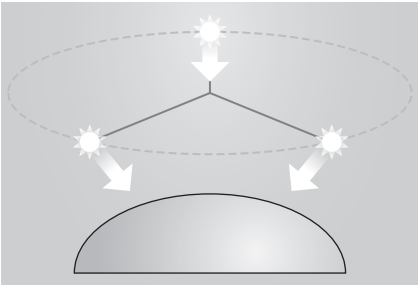

図4　照明位置は、光源の設定構成に基づく。3つの光源は、仰角が30°となる円周上の、隣の光源との中心角がそれぞれ120°になる位置に配置されている。

静止物体への適用

フォトメトリックステレオの登録対象領域または物体は、静止している必要がある。ただし、次のセクションで説明するように、移動物体に対して解析を行うことも可能である。どのように計算するかにかかわらず、フォトメトリックステレオ解析によって得られるのは、物体の表面法線とアルベドの推定結果である。

得られるアルベドは、反射光強度の割合（%）として表される、表面材料のアルベド推定値である。表面反射率の変化（高いか低いか）は、アルベド画像結果にはっきりと現れるはずである。その拡散反射率の変化は、材料特性の変化を表している可能性があり、視覚的コントラストの強調に利用できる（**図5**）。コントラストが強調されれば、後続の画像解析が簡素化され、直ちに可能になる場合もある。

2つめの計算結果は、表面法線である。表面法線の急激な変化は、亀裂、引っかき傷、くぼみなどの欠陥の存在を表している可能性がある。表面法線からは、局所表面曲率など、複数の結果が導出できる。この曲率結果は、法線方向の局所的変化（平らな表面上の突起やくぼみなど）を一般的に強調するため、法線ベクトル場よりも解析が容易である可能性がある。例えば、印字によってエンボス加工された記号が見えにくいといった状態が解消される（**図6**）。

曲率の変化は、信号の変化やノイズに左右される可能性があり、その後の解析が難しい。法線から導出される他の指標を使用することにより、局所的な変化を強調することができる。

移動物体への適用

フォトメトリックステレオ法の理想的な適用対象は、静止物体または領域だが、ベルトコンベア上にあるものなど、移動物体の解析を実行することも可能である。物体の動きを考慮に入れるために、画像を再調整して、別の画像が撮影された時間に合わせて物体位置を補正する必要がある。これを行うには、追加で最初と最後の画像を完全照明下で撮影して解析し、物体の変位を算出しなければならない[10]。

続いて、この前後の新しい画像で挟まれた画像（特定方向の照明で撮影されたフォトメトリックステレオのソース画像）を、各画像の物体の位置が同じになるように変換する。画像は、十分に高速に動作するカメラで撮影されており、変位は小さいので射影歪みや視差も最小限に抑えられる。

フォトメトリックステレオ法は、複数画像における照明と反射率の既知の組み合わせを利用して、表面曲率を解析し、表面法線の変化を強調するものである。表面法線の変化は、シリアルナンバーなどのエンボス加工または彫刻加工された形状や、亀裂、引っかき傷、くぼみなどの欠陥を表す。費用対効果の高い方法で、局所的な特徴の画像を生成して解析することのできるこのイメージング手法は、マシンビジョン業界の強力なツールとなる可能性がある。

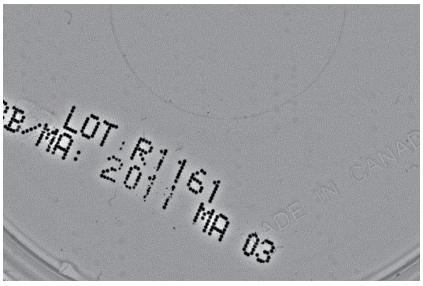

図5　図3の4枚のソース画像を用いたアルベド解析により、印字を強調することができる。

図6　図3のソース画像から取得した局所表面曲率により、印字を目立たなくしてエンボス加工の記号を強調した様子。

参考文献

(1) R. J. Woodham, Opt. Eng., 19, 1, 139–144 (Jan/Feb. 1980); see http://bit.ly/photometricref1.
(2) E. Angel and D. Shreiner, Interactive Computer Graphics: A top-down approach with shader-based OpenGL, Addison-Wesley, Boston, MA (2012).
(3) J. Lim et al., Proc. ICCV'05, 2, 1635–1642, Beijing, China (Oct. 2005); see http://bit.ly/photometricref3.
(4) See http://bit.ly/photometricref4.
(5) See http://bit.ly/photometricref5.
(6) See http://bit.ly/photometricref6.
(7) R. J. Woodham, J. Opt. Soc. Am., 11, 11, 3050–3068 (1994); see http://bit.ly/photometricref7.
(8) See http://bit.ly/photometricref8.
(9) T. Papadhimitri and P. Favaro, Proc. BMVC 2014, Nottingham, England (2014); see http://bit.ly/photometricref9.
(10) See http://bit.ly/photometricref10.

著者紹介

アーノード・リナ（Arnaud Lina）は、加マトロックス・イメージング社（Matrox Imaging）の研究およびイノベーション担当ディレクター、ピエラントニオ・ボリエロ（Pierantonio Boriero）は同製品管理担当ディレクター、カティア・オストロフスキ（Katia Ostrowski）は同コミュニケーションスペシャリスト。
URL: www.matrox.com

LFWJ